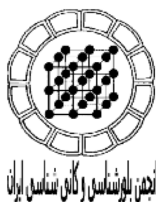
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۹، از صفحهٔ ۵۷۷ تا ۵۹۰



بررسی شیمی و چگونگی تشکیل کانی‌های کالک سیلیکاتی در پهنه اسکارنی آغبلاغ، شمال اشنویه، استان آذربایجان‌غربی، شمال غرب ایران

نسرین خواجه محمدلو*[۱]، علی اصغر کلاگری[۱]، کمال سیاه چشم[۱]، علی عابدینی[۲]

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۵/۳۰، نسخه نهایی: ۹۸/۹/۱۱)

چکیده: منطقه آغبلاغ در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشنویه، در استان آذربایجان‌غربی، شمال‌غرب ایران واقع است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ذخیره اسکارن آهن- مس این منطقه به دو پهنه گارنت اسکارن و گارنت- پیروکسن اسکارن قابل تفکیک است. بر پایه نتایج ریز کاوالکترونی، ترکیب شیمیایی گارنت‌های این ذخیره از نوع آندرادیت-گروسولار با جزء غالب آندرادیتی است. پیروکسن‌ها نیز از نظر ترکیبی از نوع دیوپسید- هدنبرژیت هستند. فرآیندهای اسکارن‌زایی در دو مرحله پیشرونده و پسرونده صورت گرفته است. نبود ولاستونیت، هم رشدی بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن و نبود بافت‌های جانشینی نشان می‌دهد که گارنت و پیروکسن به صورت همزمان در گستره دمایی ۵۰۰-۴۵۰ ^{o}C با گریزندگی اکسیژن 10^{-26} تا $fO_2 = 10^{-23}$ در مرحله پیشرونده تشکیل شده‌اند. در مرحله پسرونده، در دماهای کمتر از ۴۳۰ ^{o}C، کانی‌های کالک سیلیکاتی بدون آب به کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت)، اکسیدها، کلریت، کوارتز و کربنات‌ها دگرسان شده‌اند. در این مرحله، در دماهای کمتر از ۴۳۰ ^{o}C، آندرادیت در گریزندگی گوگرد، $fS_2 > 10^{-6}$ به مجموعه‌های کوارتز+کلسیت+پیریت و در $fS_2 < 10^{-6}$ به کوارتز + کلسیت + مگنتیت دگرسان شده است.

واژه‌های کلیدی: *آغبلاغ؛ اشنویه؛ شیمی‌کانی؛ کالک‌سیلیکاتی؛ آذربایجان‌غربی.*

مقدمه

اسکارن آهن- مس آغبلاغ در استان آذربایجان غربی (شمال غرب ایران) و در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشنویه، بین طول‌های جغرافیایی ۴۵° ۱′ ۵۹″ تا ۴۵° ۴′ ۳۴″ و عرض‌های جغرافیایی ۳۷° ۸′ ۵۹″ تا ۳۷° ۱۲′ ۴۱″ واقع است. بر پایه مشاهدات صحرایی در این منطقه، نفوذ توده گرانیتی کرتاسه پسین به درون سنگ‌های کربناتی، ماسه‌سنگی و شیلی کامبرین با رخداد پدیده اسکارن‌زایی همراه شده است. در بخش شمالی کمربند ارومیه–گلپایگان در شمال پهنه سنندج-سیرجان به ذخایر اسکارنی مهمی چون اسکارن مس مزرعه [۱]، مس انجرد [۲]، آهن آستامال [۳]، مس سونگون [۴]، آهن پهناور [۵] و آهن میانه [۶] می‌توان اشاره کرد که بررسی‌های دقیقی بر آنها انجام شده است. این در حالی است که تاکنون پژوهش بسیار کمی پیرامون ذخیره اسکارن آهن- مس آغبلاغ صورت گرفته است. تشکیل و گسترش اسکارن آهن–مس آغبلاغ در ارتباط با مجموعه نفوذی اشنویه به سن کرتاسه پسین است. مجموعه نفوذی یاد شده ۹ توده با ابعادی در حد استوک را شامل می‌شود که در سه خانواده گرانیتی، دیوریت و گرانیت قلیایی سینیت قلیایی قابل رده‌بندی است [۷]. بر پایه پژوهش قلمقاش و همکاران [۷]، جایگیری توده‌های نفوذی اشنویه در دو مرحله زمانی رخ داده است، نخست، توده‌های دیوریتی و گرانیتی به طور همزمان (یا با اختلاف زمانی کوتاه)

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۱۴۹۶۲، نمابر: ۰۴۱۳۳۳۳۶۰۲۷، پست الکترونیکی: mohammadlou_n@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

پدید آمده‌اند و سپس توده‌های سینیت قلیایی گرانیتی قلیایی با قطع کردن آنها جایگزین شده‌اند. مرحله نخست فعالیت ماگمایی حدود ۱۰۰ میلیون سال پیش و مرحله دوم حدود ۸۰ میلیون سال پیش رخ داده است [۷]. در این پژوهش، کانی‌شناسی، دگرنهادی و کانی سازی در مراحل پیشرونده و پسرونده فرآیند اسکارنی و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن بررسی شده است.

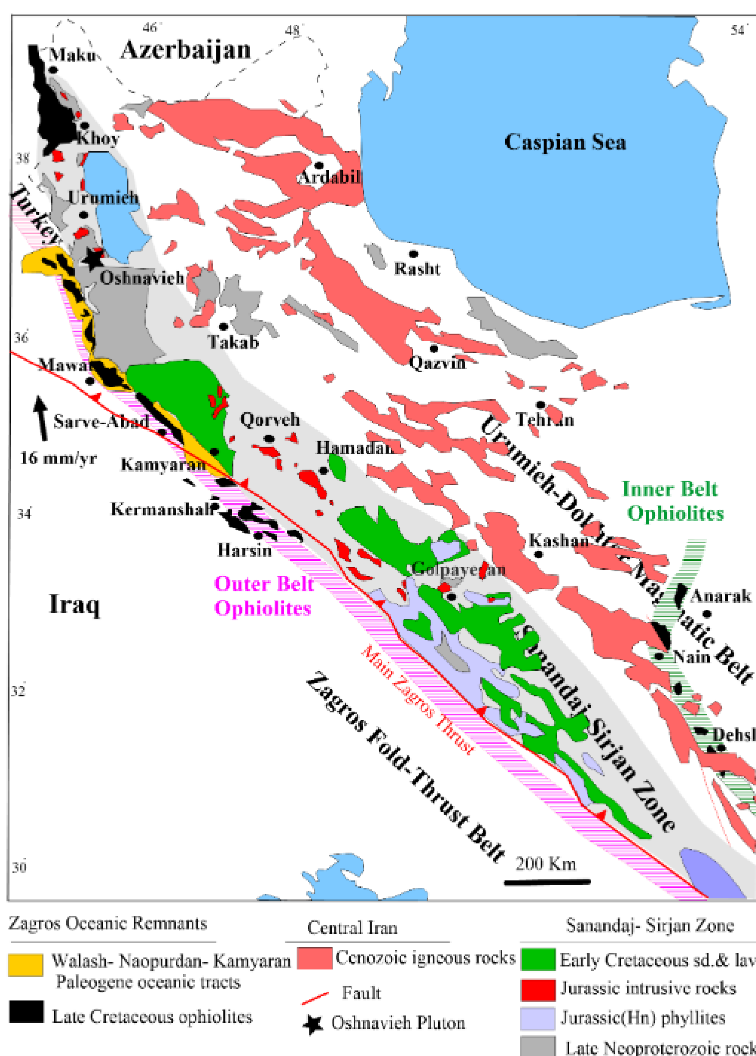
روش پژوهش

بررسی‌های انجام شده بر اسکارن آغبلاغ شامل دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی (میکروسکوپی و تجزیه نقطه‌ای) است. بررسی‌های صحرایی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه، شناسایی مرز واحدها و نمونه برداری از پهنه‌های اسکارنی برای بررسی‌های آزمایشگاهی است. پس از بررسی‌های دقیق صحرایی، به منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی، تعداد ۵۰ نمونه مقطع نازک صیقلی تهیه شد. برای تعیین ترکیب و محاسبه فرمول ساختاری، شماری از کانی‌ها (گارنت، پیروکسن و اپیدوت) توسط دستگاه Cameca مدل Sx100 ساخت شرکت فرانسه با ولتاژ ۲۰ کیلو الکترون ولت، جریان ۲۰ نانو آمپر و قطر باریکه ۵ میکرون درآزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه نقطه‌ای شدند.

بحث و بررسی

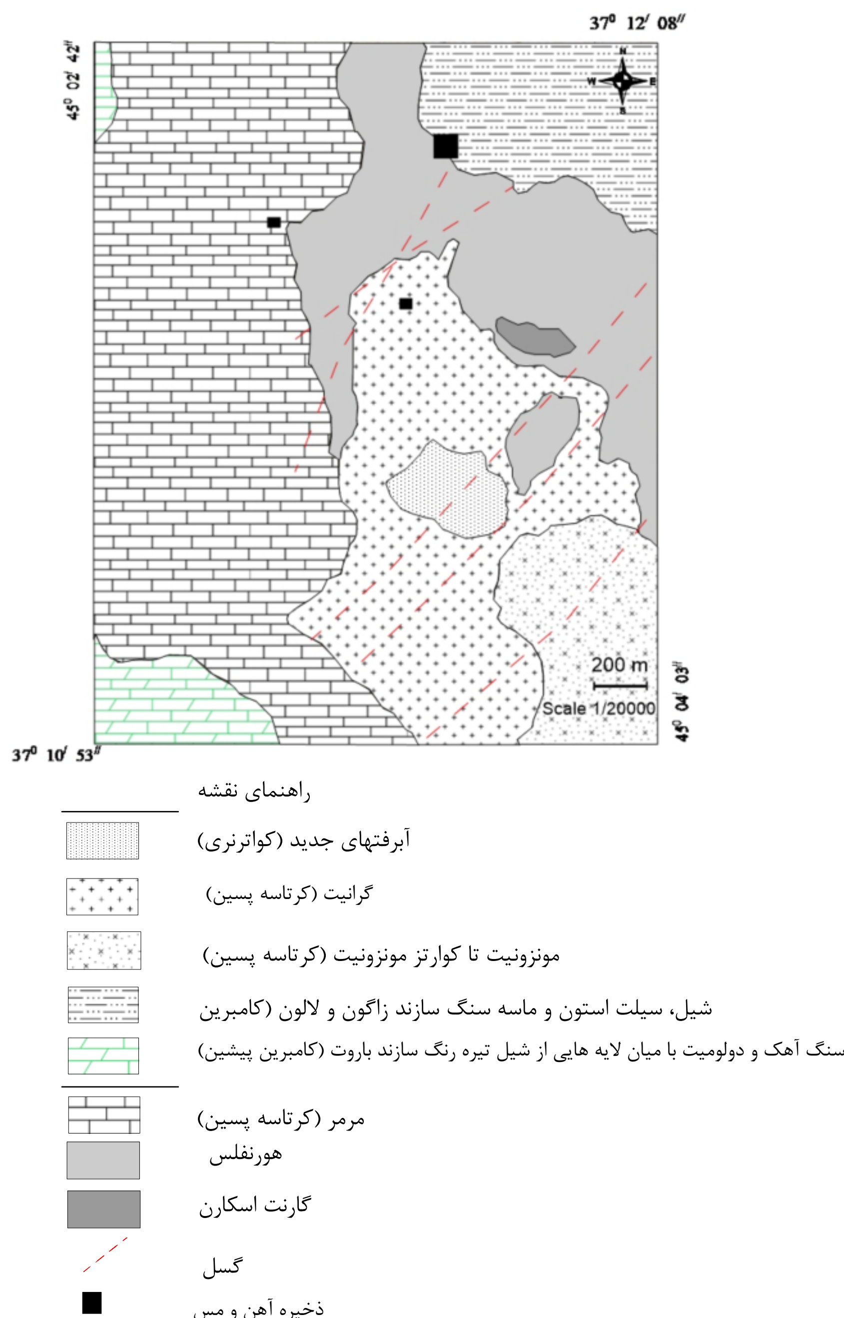
جایگاه زمین شناسی

اسکارن آغبلاغ در ارتباط با توده نفوذی کرتاسه پسین اشنویه است که از نظر تقسیمات ساختاری ایران در بخش انتهای شمال غربی پهنه سنندج-رسیرجان قرار دارد (شکل ۱) [۸].



شکل ۱ نقشه بخشی از پهنه ساختاری ایران (بر گرفته از مرجع [۸] با تغییرات) که در آن جایگاه منطقه آغبلاغ با علامت ستاره نشان داده شده است.

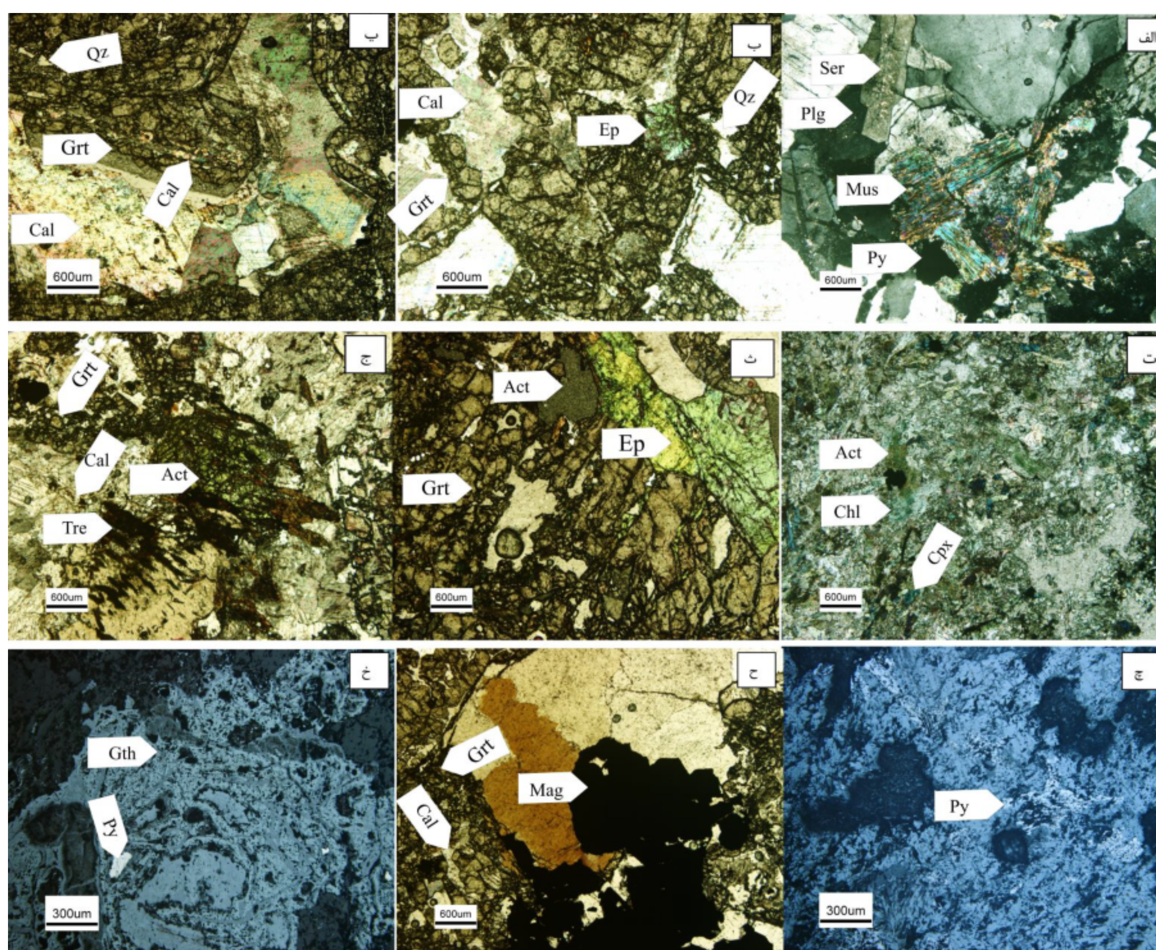
توده نفوذی یاد شده سبب تشکیل اسکارن‌هایی از جمله ذخایر تنگستن (دوربه) [۹]، اسکارن آهن (گرده گل) [۱۰] و اسکارن آهن- مس آغبلاغ [۱۱] در منطقه اشنویه شده است. واحدهای سنگی منطقه بر پایه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی و با استناد به نقشه زمین شناسی تهیه شده از منطقه [۱۲] (شکل ۲) به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازند باروت (کامبرین پیشین)، سازند زاگون-لالون (کامبرین پیشین) و واحدهای نفوذی با ترکیب گرانیت و کوارتزمونزونیت تا مونزودیوریت (کرتاسه پسین) است (شکل ۲). سنگ کالک، دولومیت با میان‌لایه‌های شیل سازند باروت با بیشترین گسترش عمده‌ترین سنگ‌های رسوبی منطقه مورد بررسی محسوب می‌شوند. بر پایه شواهد صحرایی و بررسی‌های زمین‌شناسی، تزریق توده نفوذی گرانیتی به درون مجموعه رسوبی یاد شده سبب دگرگونی همبری، تشکیل اسکارن و کانی‌سازی آهن و مس در منطقه آغبلاغ شده است.



شکل ۲ نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه آغبلاغ اشنویه (برگرفته از مرجع [۱۲] با تغییرات).

سنگ‌نگاری و کانه‌زایی

واحد گرانیت: سنگ‌های این واحد در نمونه دستی به رنگ سفید و دربردارنده بلورهای درشت فلدسپار، کوارتز و مسکوویت با بافت دانه‌ای هستند. در زیر میکروسکوپ، کانی‌های اصلی شامل فلدسپارهای قلیایی، کوارتز، پلاژیوکلاز، هورنبلند و مسکوویت هستند و به طور عمده بافت دانه‌ای نشان می‌دهند. میکروکلین (۲۰ تا ۶۰ ٪) در اندازه ریز تا متوسط (تا ۲ mm) به صورت بلورهای بی‌شکل و نیمه شکل‌دار با بافت مشبک و پرتیتی در نمونه ها دیده می‌شود. کوارتز (۲۰ تا ۴۰ ٪) در اندازه ریز تا متوسط (تا 1mm) به صورت بلورهای بی‌شکل با خاموشی موجی فضای بین بلورها را پر می کند. پلاژیوکلاز در اندازه ریز تا متوسط (تا ۲ mm) به صورت بلورهای بی‌شکل و نیمه شکل‌دار با ماکل چندریخت دیده می‌شود. کانی موسکویت در اندازه ریز تا درشت (تا10mm) به صورت صفحه‌های بی شکل حضور دارد (شکل ۳ الف). توده نفوذی به شدت دگرسان شده و کانی‌های میکروکلین و پلاژیوکلاز به رس‌ها، کلریت و سریسیت تبدیل شده‌اند. پیریت مهمترین کانی سولفیدی در این سنگ‌هاست.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سنگی توده نفوذی و پهنه برون‌اسکارن درمنطقه آغبلاغ: (الف) تشکیل سریسیت و کانی‌های رسی در اثر دگرسانی پلاژیوکلاز همراه با مسکوویت و پیریت در توده نفوذی تهیه شده در نور قطبیده متقاطع (xpl)، (ب) گارنت نیمه شکل‌دار ریز بلور همراه با گارنت درشت‌بلور که در اثر دگرسانی پسرونده به اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند در نور xpl. (پ) گارنت درشت‌بلور با شکستگی‌های فراوان که محل آنها توسط کلسیت و کوارتز پر شده است، در نور xpl، (ت) کانی کلینوپیروکسن که به صورت بخشی یا کامل توسط آکتینولیت و کلریت جانشین شده است، در نور xpl، (ث) اپیدوت و آکتینولیت که جانشین گارنت‌ها شده‌اند، (ج) جانشینی گارنت و کلینوپیروکسن توسط ترمولیت-آکتینولیت، در نور xpl، (چ) حضور پیریت بین کانی‌های کالک سیلیکاتی، در نور قطبیده صفحه‌ای (ppl)، (ح) حضور مگنتیت همراه با گارنت، در نور xpl. (خ) اکسایش پیریت به گوتیت و حضور بقایایی از آن درون گوتیت، در نور ppl. علائم اختصاری کانی ها Plg: پلاژیوکلاز، Mus: مسکوویت، Act: آکتینولیت، Chl: کلریت، Mag: مگنتیت، Grt: گارنت، Cpx: کلینوپیروکسن، Py: پیریت، Gth: گوتیت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Tre: ترمولیت، Ser: سریسیت، (برگرفته از مرجع [۱۳]) هستند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

واحد اسکارن: سنگ‌های کربناتی ناخالص سازند باروت و ماسه-سنگ و شیل سازند زاگون سنگ‌های مادر هاله اسکارنی به شمار می‌آیند. این سنگ‌ها در اثر جایگیری گرانیت، به سنگ‌های کالک‌سیلیکاتی و مرمر تبدیل شده‌اند. بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری در این منطقه، پهنه درون‌اسکارن دیده نشد و اسکارن اصلی پهنه برون‌اسکارن است. گارنت و پیروکسن از جمله کانی‌های مرحله پیشرونده و اپیدوت، آکتینولیت، ترمولیت، کلریت، کلسیت و کوارتز از کانی‌های مرحله پسرونده هستند. بر پایه چیرگی کانی‌های موجود در مقاطع میکروسکوپی و همبری‌های شاخص، سنگ‌های برون‌اسکارن را می‌توان به دو دسته گارنت اسکارن و پیروکسن- گارنت اسکارن تقسیم نمود. نتایج سنگ‌نگاری کانی‌های پهنه برون‌اسکارنی در زیر بیان شده است:

گارنت: بر پایه مشاهدات سنگ‌نگاری، گارنت کانی غالب پهنه برون‌اسکارن است که بیش از ۷۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. بر اساس ویژگی‌های نوری، دو نوع گارنت قابل تشخیص است نوع نخست در اندازه‌های ریز (تا ۱ میلی‌متر) به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار با بافت توده‌ای و همسانگرد دیده می‌شود. این نوع گارنت‌ها به شدت دگرسان شده و توسط کانی‌هایی چون اپیدوت، آکتینولیت، مگنتیت، کلسیت و کوارتز طی مراحل بعدی فرآیند تکاملی اسکارنی جانشین شده‌اند (شکل ۳ ب). گارنت نوع دوم درشت بلور است (تا ۱ سانتی‌متر) و به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار با شکستگی‌های فراوان دیده می‌شود. این نوع گارنت‌ها توسط کلسیت، کوارتز و اپیدوت پر شده‌اند (شکل ۳ پ).

پیروکسن: کانی پیروکسن به عنوان کانی سیلیکاتی بدون آب در مراحل اولیه فرآیند تکاملی اسکارن (مرحله پیشرونده) تشکیل شده و اغلب توسط گارنت همراهی می‌شود. بر پایه ویژگی‌های نوری، پیروکسن‌ها از نوع کلینوپیروکسن هستند و در اندازه‌های ریز بلور نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شوند. اغلب پیروکسن‌ها به شدت دگرسان شده و توسط ترمولیت- آکتینولیت و کلریت جانشین شده‌اند (شکل ۳ ت). کلینوپیروکسن‌های سالم به صورت پراکنده و در یک زمینه کلسیتی دیده می‌شوند.

اپیدوت: کانی اپیدوت پس از گارنت و پیروکسن فراوان‌ترین کانی پهنه اسکارنی است. این کانی در اندازه‌های متوسط تا درشت به صورت بی‌شکل و تخته‌ای قابل مشاهده بوده و اغلب گارنت‌ها را جانشین کرده است (شکل‌های ۳ ب و ث).

ترمولیت-آکتینولیت: این کانی در اندازه ریز تا متوسط و به صورت بلورهای دسته جارویی و رشته‌ای به رنگ‌های قهوه‌ای (ترمولیت) و سبز (آکتینولیت) که جانشین کلینوپیروکسن‌ها شده‌اند، دیده می‌شود (شکل ۳ ج).

کلریت: این کانی فرعی به صورت پولک‌های ریز و بی‌شکل طی مراحل پایانی فرآیند تکاملی اسکارن از دگرسانی اپیدوت و ترمولیت-آکتینولیت شکل گرفته است (شکل ۳ ت).

کلسیت: این کانی در اندازه ریز تا متوسط و به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار با بافت موزائیکی، پرکننده فضاهای خالی و یا جانشینی با رخ لوزوجهی دیده می‌شود. کلسیت به صورت اولیه همراه با کانی گارنت و یا در اثر دگرسانی بعدی این کانی تشکیل شده است (شکل‌های ۳ ب و پ).

کوارتز: این کانی در اندازه ریز و به صورت بلورهای بی‌شکل با خاموشی موجی دیده می‌شود. کوارتز هم به صورت اولیه و هم به صورت ثانویه در اثر دگرسانی پسرونده کانی‌های کالک سیلیکاتی بدون آب (گارنت و پیروکسن) شکل گرفته و اغلب فضای شکستگی‌ها را پر کرده است (شکل‌های ۳ ب و پ).

کانی‌های فلزی: پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت مهمترین کانی‌های تیره در اسکارن اغبلاغ هستند. پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است و در اندازه‌های ریز تا متوسط به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار دیده می‌شود و اغلب توسط کالکوپیریت جانشین شده است (شکل ۳ چ). مگنتیت در اندازه‌های ریز تا متوسط نیمه شکل و بی‌شکل به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی دیده می‌شود که فرآورده دگرسانی گارنت‌هاست (شکل ۳ ح). هماتیت در اثر مارتیتی-شدن مگنتیت تشکیل شده است. کالکوپیریت در اندازه ریز و به صورت بلورهای بی‌شکل بلورهای پیریت را جانشین کرده است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در اثر فرآیندهای هوازدگی سولفیدهای آهن شکل گرفته‌اند، به طوریکه در پهنه برونزاد، برخی از پیریت‌ها به طور کامل توسط گوتیت جانشین شده و گاهی ذراتی از پیریت هنوز در گوتیت دیده می‌شوند (شکل ۳ خ). توالی همبریی این کانی‌ها بر اساس مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی و با در نظر گرفتن روابط بافتی بین کانی‌های سازنده اسکارن آغبلاغ، در جدول ۱ ارائه شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

جدول ۱ روابط همبرزایی کانی‌های روشن و تیره در اسکارن آغبلاغ.

سیلیکاتهای متاسوماتیک، سولفیدها، اکسیدها و کربناتها		کاهش → آلتراسیون متاسوماتیک پیشرو مرحله ۱	مرحله ۲	پسرونده مرحله ۱	مرحله ۲	سوپرژن
سیلیکاتها	گارنت					
	پیروکس					
	آمفیبو					
	اپیدوت					
	کلریت					
	کوارتز					
سولفید	[illegible]					
	کالکوپی					
اکسید ه	مگنتیت					
	هماتیت					
	گوتیت					
کربنات	کلسد					

شیمی کانی‌ها: در این بخش شیمی کانی، سه کانی گارنت، پیروکسن و اپیدوت که از مهم ترین و فراوان‌ترین کانی‌های موجود در اسکارن آغبلاغ هستند بررسی شده است.

گارنت: نتایج ریزکاو الکترونی (جدول۲) گارنت‌های موجود در پهنه گارنت– اسکارن گستره ترکیبی $Gr_{0.05.6.8}$ $Alm_{5.6-10.7}$ $Adr_{81.97-89.1}$ و در پهنه پیروکسن–گارنت اسکارن، گستره ترکیبی $Alm_{5.1-7.5}$ $Gr_{25.4-27.2}$ $Adr_{61.7-62.5}$ را نشان می‌دهند. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها از نوع محلول جامد (آندرادیت–گروسولار) و به طور غالب آندرادیت است (شکل ۴) [۱۴]. بخش عمده بلورهای گارنت در تصویرهای الکترونی پس پراکنده (BSE) همسانگرد و بدون منطقه‌بندی هستند. فقط تغییرات بسیار کمی در ترکیب گارنت دیده می‌شود که این تغییرات می‌توانند ناشی از تغییرات جزئی در ترکیب سیال‌های کانه ساز باشند (شکل‌های ۵ الف، ب و پ). عنصرسنجی این گارنت‌ها به صورت زیر است:

$$Al_{(0.01-3.42)}Ca_{(22.07-22.83)}Mn_{(0.7-1.91)}Si_{(17.28-18.12)}Ti_{(0-0.15)}Fe_{(17.28-21.56)}Mg_{(0-0.05)}Na_{(0-0.06)}P_{(0-0.02)} \quad (۱)$$

پیروکسن: نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی نشان می‌دهد که پیروکسن در گستره ترکیبی $aDi_{0.56-0.65}$, $aHd_{0.29-0.42}$ قرار دارد (جدول ۳). کانی‌های پیروکسن نیز مانند گارنت منطقه‌بندی ندارند و تغییرات نوسانی نشان نمی‌دهند [۱۵] (شکل‌های ۵ ث و ج). پیروکسن‌های اسکارن آغبلاغ از نوع سالیت بوده و از نظر ترکیب شیمیایی در سری محلول جامد دیوپسید-هدنبرژیت قرار دارند (شکل ۶) [۱۶]. نتایج عنصرسنجی آن به صورت زیر است:

$$Al_{(0.07-6.38)}Ca_{(16.51-21.2)}Mn_{(1.28-2.9)}Si_{(16.92-24.26)}Ti_{(0-0.08)}Fe_{(8.24-12.75)}Mg_{(0.06-6.25)}Na_{(0-01-0.23)}P_{(0-0.01)} \quad (۲)$$

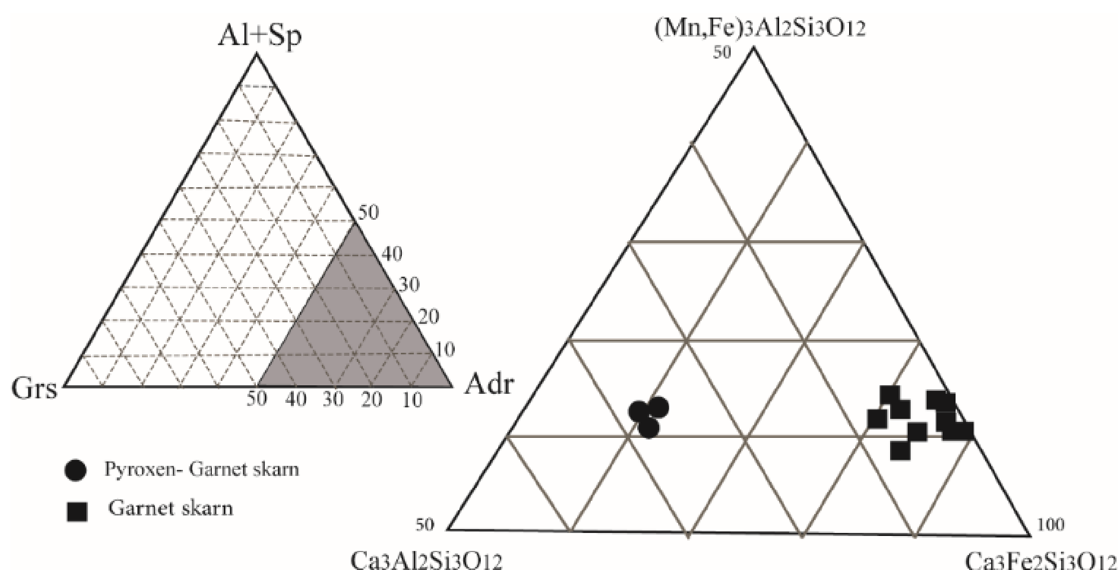
کلینوپیروکسن‌های ذخیره آغبلاغ دارای مقدار بالایی از نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ و مقادیر کمی از TiO_2، MnO و Cr_2O_3 هستند. جانشینی Fe و Mg به وسیله Mn معمول است، زیرا دیوپسید-هدنبرژیت-ژوهانسینیت تشکیل محلول جامد می‌دهند. مقدار Mn در پیروکسن با رابطه Fe/Mg نسبت مستقیم دارد و با افزایش Mn این نسبت نیز افزایش می‌یابد [۱۷].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی گارنت از پهنه‌های گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت در اسکارن آغبلاغ. مقادیر آهن سه ظرفیتی بر اساس روش مرجع [۱۴] محاسبه شده است.

	پهنه گارنت اسکارن												پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن		
نمونه	N1-B-1			N1-B-2			N1-B-3		N1-B-4		N1-B-5		N11-A		
	مرکز		لبه	مرکز		لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز		لبه
اکسیدهای اصلی (Wt%)															
SiO_2	۳۷٫۵۶	۳۸٫۲۴	۳۸٫۶۵	۳۸٫۶۵	۳۸٫۷۷	۳۷٫۷۶	۳۷٫۹۲	۳۷٫۸۷	۳۸٫۵۶	۳۷٫۹۵	۳۷٫۶۲	۳۸٫۷۳	۳۶٫۹۶	۳۷٫۴۲	۳۶٫۹۸
TiO_2	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۲۰	۰٫۲۵	۰٫۱۲
Al_2O_3	۰٫۸۶	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۰۱	۱٫۳۷	۱٫۲۱	۶٫۴۶	۵٫۷۱	۶٫۴۶
FeO	۲۶٫۸۴	۲۷٫۵۲	۲۶٫۵۴	۲۷٫۶۴	۲۶٫۵۹	۲۷٫۷۴	۲۷٫۶۰	۲۷٫۶۲	۲۶٫۸۰	۲۷٫۲۸	۲۶٫۶۰	۲۵٫۸۶	۲۳٫۳۴	۲۳٫۱۷	۲۲٫۹۳
MnO	۱٫۴۲	۱٫۲۱	۰٫۹۴	۰٫۹۷	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۰٫۹۱	۱٫۰۰	۰٫۹۰	۱٫۳۰	۱٫۰۳	۱٫۰۰	۲٫۰۵	۱٫۸۳	۲٫۴۶
MgO	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۷
CaO	۳۱٫۶۵	۳۰٫۹۲	۳۱٫۴۷	۳۱٫۴۱	۳۱٫۷۶	۳۱٫۵۰	۳۱٫۷۳	۳۱٫۶۹	۳۱٫۹۴	۳۱٫۵۹	۳۲٫۲۶	۳۲٫۰۴	۳۰٫۹۸	۳۰٫۸۸	۳۰٫۷۸
مجموع	۹۸٫۴۱	۹۸٫۸۵	۹۸٫۵۰	۹۸٫۸۱	۹۸٫۳۴	۹۸٫۱۶	۹۸٫۳۱	۹۸٫۳۷	۹۸٫۳۷	۹۸٫۱۶	۹۸٫۹۲	۹۸٫۸۵	۱۰۰٫۰۴	۹۹٫۳۴	۹۹٫۸۰
تعداد یونها محاسبه شده بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن و عضو پایانی گارنت															
Si	۳٫۱۲	۳٫۱۷	۳٫۲۱	۳٫۲۰	۳٫۲۳	۳٫۱۵	۳٫۱۶	۳٫۱۶	۳٫۲۱	۳٫۱۷	۳٫۱۰	۳٫۲۰	۲٫۹۸	۳٫۰۴	۲٫۹۹
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Al	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۶۱	۰٫۵۵	۰٫۶۲
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe^{3+}	۱٫۶۷	۱٫۵۷	۱٫۵۰	۱٫۵۸	۱٫۵۳	۱٫۶۸	۱٫۶۶	۱٫۶۷	۱٫۵۷	۱٫۶۶	۱٫۶۶	۱٫۴۹	۱٫۴۰	۱٫۳۴	۱٫۴۰
Fe^{2+}	۰٫۲۰	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۵	۰٫۳۰	۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۲۹	۰٫۱۷	۰٫۲۳	۰٫۱۵
Mn	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۷
Mg	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ca	۲٫۸۲	۲٫۷۵	۲٫۸۰	۲٫۷۹	۲٫۸۳	۲٫۸۲	۲٫۸۳	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۸۳	۲٫۶۸	۲٫۶۹	۲٫۶۶
OH	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰
الماندین	۶٫۴۳	۱۰٫۶۸	۱۰٫۷۳	۱۰٫۴۹	۹٫۹۴	۸٫۳۰	۸٫۳۵	۸٫۰۰	۹٫۲۳	۷٫۷۹	۵٫۶۴	۹٫۱۴	۵٫۶۷	۷٫۵۸	۵٫۱۳
اسپسارتین	۳٫۲۰	۲٫۶۸	۲٫۰۶	۲٫۱۳	۲٫۱۸	۲٫۲۰	۲٫۰۳	۲٫۲۴	۱٫۹۸	۲٫۹۰	۲٫۳۲	۲٫۱۹	۴٫۶۸	۴٫۱۲	۵٫۶۲
پیروپ	۰٫۱۶	۰٫۰۸	۰٫۰۰	۰٫۱۵	۰٫۱۹	۰٫۱۲	۰٫۰۰	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۰۴	۰٫۲۰	۰٫۳۲	۰٫۲۸
گروسولار	۴٫۳۵	۴٫۵۹	۴٫۷۴	۰٫۸۵	۰٫۶۷	۰٫۷۸	۰٫۶۸	۰٫۷۸	۰٫۸۸	۰٫۰۵	۶٫۸۲	۶٫۴۸	۲۷٫۲۱	۲۵٫۴۶	۲۷٫۲۲
اندرادیت	۸۵٫۸۷	۸۱٫۹۷	۸۲٫۴۷	۸۶٫۳۷	۸۷٫۰۲	۸۸٫۶۰	۸۸٫۹۴	۸۸٫۸۶	۸۷٫۸۷	۸۹٫۱۴	۸۵٫۰۵	۸۲٫۱۶	۶۲٫۲۳	۶۲٫۵۲	۶۱٫۷۵
اوواروویت	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰

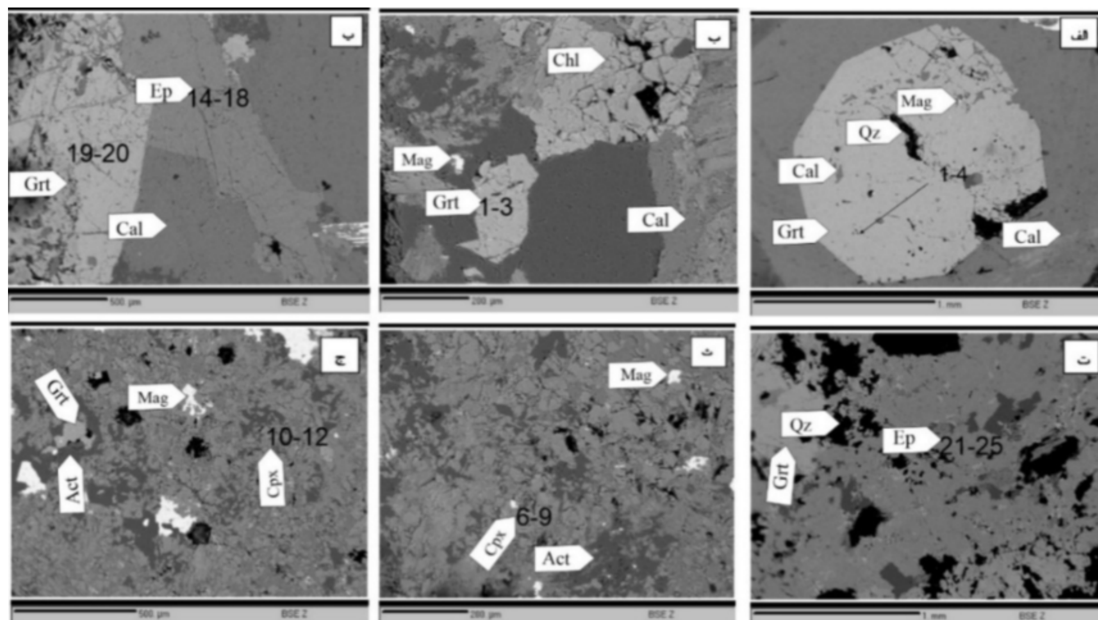


شکل ۴ جایگاه کانی‌های گارنت اسکارن آغبلاغ بر نمودارهای مثلثی آندرادیت- گروسلار- آلماندین + اسپسارتین [۱۴].

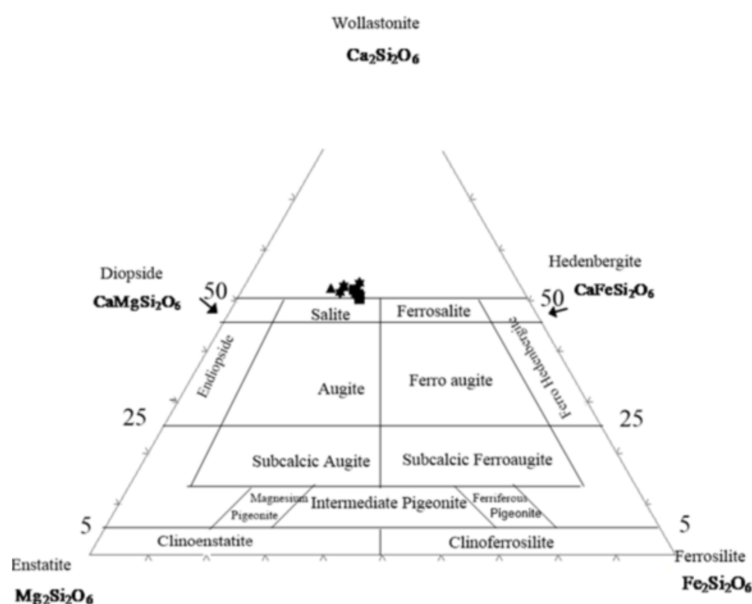
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

جدول ۳ نتایج تجزیه ریز کاوالکترونی کانی پیروکسن از پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن کانسار آغبلاغ.

نمونه	N11-A-1			N11-A-2			N11-A-3			
	مرکز		لبه	مرکز		لبه	مرکز			لبه
SiO_2 (Wt%)	۵۱٫۹	۵۰٫۶۷	۵۱٫۳۴	۵۰٫۸۳	۵۱٫۴۴	۵۱٫۶۵	۵۱٫۰۹	۵۱٫۷۳	۵۱٫۷۳	۴۹٫۹۵
TiO_2	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۴
Al_2O_3	۰٫۵۳	۰٫۸	۰٫۳۷	۰٫۱۷	۰٫۴۱	۰٫۴۵	۰٫۴	۰٫۱۹	۰٫۱۳	۰٫۹۲
FeO	۱۲٫۳	۱۴٫۶۱	۱۲٫۷۶	۱۱٫۷۷	۱۲٫۷۶	۱۲٫۴۹	۱۳٫۰۲	۱۱٫۹	۱۰٫۶	۱۳٫۸۶
MnO	۲٫۰۷	۲٫۱۲	۲٫۱۶	۲٫۳	۲٫۱	۲٫۱۱	۲٫۰۲	۲٫۱۸	۲٫۱۲	۱٫۶۵
MgO	۹٫۵	۹٫۲۴	۹٫۳۲	۱۰٫۵۹	۹٫۹۷	۹٫۵	۹٫۲۷	۱۰٫۳۷	۹٫۹۹	۸٫۷۳
CaO	۲۳٫۱	۲۳٫۲	۲۳٫۳۹	۲۳٫۴۸	۲۳٫۸۸	۲۳٫۴۱	۲۳٫۱۹	۲۳٫۷۷	۲۴٫۴	۲۳٫۹
K_2O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱
مجموع	۹۹٫۶۵	۱۰۰٫۹۵	۹۹٫۵۳	۹۹٫۳۱	۱۰۰٫۷۸	۹۹٫۸۵	۹۹٫۱۵	۱۰۰٫۳۱	۹۹٫۱۲	۹۹٫۲۴
تعداد یونهای محاسبه شده بر پایه ۶ اتم اکسیژن و عضو پایانی کلینوپیروکسن										
Si	۱٫۹۹۷	۱٫۹۳۳	۱٫۹۸۳	۱٫۹۵۳	۱٫۹۵۵	۱٫۹۸۴	۱٫۹۸۱	۱٫۹۷۰	۱٫۹۹۳	۱٫۹۳۹
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱
Al	۰٫۰۲۴	۰٫۰۳۶	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۲۰	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۶	۰٫۰۴۲
Fe^{3+}	۰٫۰۰۱	۰٫۱۲۱	۰٫۰۲۹	۰٫۰۹۷	۰٫۰۸۷	۰٫۰۲۹	۰٫۰۳۱	۰٫۰۶۳	۰٫۰۱۸	۰٫۰۹۱
Fe^{2+}	۰٫۳۹۵	۰٫۳۴۵	۰٫۳۸۳	۰٫۲۸۱	۰٫۳۱۸	۰٫۳۷۲	۰٫۳۹۱	۰٫۳۱۶	۰٫۳۲۳	۰٫۳۵۹
Mn	۰٫۰۶۷	۰٫۰۶۸	۰٫۰۷۱	۰٫۰۷۵	۰٫۰۶۸	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۶	۰٫۰۷۰	۰٫۰۶۹	۰٫۰۵۴
Mg	۰٫۵۴۵	۰٫۵۲۵	۰٫۵۳۷	۰٫۶۰۷	۰٫۵۶۵	۰٫۵۴۴	۰٫۵۳۶	۰٫۵۸۹	۰٫۵۷۴	۰٫۵۰۵
Ca	۰٫۰۹۵	۰٫۹۴۸	۰٫۹۶۸	۰٫۹۶۷	۰٫۹۷۲	۰٫۹۶۴	۰٫۹۶۴	۰٫۹۷۰	۱٫۰۰۷	۰٫۹۹۴
Na	۰٫۰۱۹	۰٫۰۲۳	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱۴
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
یشم سبز	۰٫۰۰۵	-۰٫۰۰۶	۰٫۰۰	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	-۰٫۰۰۴	۰٫۰۰	-۰٫۰۰۳
دیوپسید	۰٫۵۸۵	۰٫۵۷۴	۰٫۵۷۵	۰٫۶۴۶	۰٫۶۲۳	۰٫۵۹۶	۰٫۵۶۷	۰٫۶۳۴	۰٫۶۵۱	۰٫۵۷۷
هدنبرژیت	۰٫۴۲۳	۰٫۳۷۶	۰٫۴۱۰	۰٫۲۹۹	۰٫۳۵۰	۰٫۴۰۷	۰٫۴۱۳	۰٫۳۴۰	۰٫۳۶۷	۰٫۴۰۹
ویزتونیت	۰٫۵۰۳	۰٫۵۲۱	۰٫۵۱۳	۰٫۵۲۱	۰٫۵۲۴	۰٫۵۱۳	۰٫۵۱۰	۰٫۵۱۷	۰٫۵۲۹	۰٫۵۳۵
انستاتیت	۰٫۲۸۸	۰٫۲۸۹	۰٫۲۸۴	۰٫۳۲۷	۰٫۳۰۴	۰٫۲۸۹	۰٫۲۸۳	۰٫۳۱۴	۰٫۳۰۱	۰٫۲۷۲
فروسیلیت	۰٫۲۰۹	۰٫۱۹۰	۰٫۲۰۳	۰٫۱۵۲	۰٫۱۷۱	۰٫۱۹۸	۰٫۲۰۷	۰٫۱۶۹	۰٫۱۷۰	۰٫۱۹۳

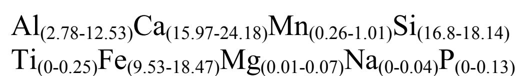


شکل ۵ تصاویر BSE تهیه شده توسط ریزکاوالکترونی از نمونه‌های اسکارنی در پهنه‌های گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت اسکارن در منطقه آغبلاغ. (الف) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلسیت، کوارتز و مگنتیت در پهنه گارنت اسکارن، (ب) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلریت و کلسیت در پهنه پیروکسن–گارنت اسکارن، (پ) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با اپیدوت و کلسیت در پهنه گارنت اسکارن، (ت) گارنت همراه با اپیدوت و کوارتز در پهنه گارنت اسکارن، (ث) کلینوپیروکسن همراه با آکتینولیت و مگنتیت در پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن و (ج) کلینوپیروکسن همراه با گارنت، مگنتیت و آکتینولیت که جانشینی مگنتیت به جای پیروکسن دیده می‌شود. اعداد روی تصاویر نقاط اندازه گیری شده توسط ریز کاوالکترونی است. علائم اختصاری کانی‌ها Chl: کلریت، Grt: گارنت، Mag: مگنتیت، Ep: اپیدوت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن (برگرفته از مرجع [۱۳] هستند).



شکل ۶ جایگاه کانی‌های پیروکسن اسکارن آغبلاغ بر نمودار مثلثی ولاستونیت- فروسیلایت- انستاتیت [۱۵].

اپیدوت: اپیدوت از جمله کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار است که اغلب به همراه کلریت و آمفیبول جانشین کانی‌های سیلیکاتی بدون آب (گارنت و پیروکسن) می‌شود [۱۸]. نتایج تجزیه ریز کاوالکترونی اپیدوت نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، اپیدوت مقادیر بالایی از Al و Ca دارد. نتایج عنصرسنجی اپیدوت به صورت زیر است:


$Al_{(2.78-12.53)}Ca_{(15.97-24.18)}Mn_{(0.26-1.01)}Si_{(16.8-18.14)}Ti_{(0-0.25)}Fe_{(9.53-18.47)}Mg_{(0.01-0.07)}Na_{(0-0.04)}P_{(0-0.13)}$

تصاویر BSE اپیدوت (شکل‌های ۵ پ و ت) نشان می‌دهند که اپیدوت‌ها بدون منطقه‌بندی هستند. برای تعیین سری محلول جامد اپیدوت $[Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)]$ از رابطه $Fe^{+3}/(Fe^{+3} + Al + Cr^{+3}-2)$ و برای عضو پایانی غنی از Al کلینوزوئیزیت $[Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)]$ از رابطه $(Al-2)/(Fe^{3+} + Al + Cr^{3+}-2)$ استفاده شد [۱۹]. اپیدوت‌های ذخیره اسکارن آغبلاغ به طور غالب از نوع اپیدوت $[Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)]$ هستند.

جدول۴ نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کانی اپیدوت ذخیره آغبلاغ.

نمونه	N1-B					N10-C				
	مرکز				لبه	مرکز				لبه
SiO_2 (Wt%)	۳۸/۸۱	۳۸/۷۷	۳۸/۶۵	۳۸/۵۶	۳۸/۶۳	۳۷/۸۸	۳۸/۱۸	۳۸/۰۰	۳۷/۶۱	۳۷/۶۶
TiO_2	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۳۹
Al_2O_3	۲۲/۶۷	۲۳/۳۱	۲۳/۳۲	۲۱/۸۹	۲۳/۶۸	۲۲/۳۸	۲۱/۹۱	۲۲/۶۱	۲۲/۰۰	۲۲/۵۷
FeO	۱۳/۷۱	۱۲/۲۶	۱۲/۵۹	۱۳/۷۱	۱۳/۲۸	۱۴/۳۵	۱۴/۵۵	۱۳/۶۹	۱۴/۳۸	۱۴/۲۶
MnO	۰/۳۶	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۳۴	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۳۴	۰/۴۵	۱/۱۸	۰/۵۳
MgO	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۲
CaO	۲۳/۶۴	۲۳/۰۸	۲۲/۸۴	۲۳/۷۷	۲۲/۳۴	۲۳/۵۴	۲۳/۲۲	۲۳/۳۹	۲۲/۹۶	۲۲/۸۵
Na_2O	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵
K_2O	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
مجموع	۹۹/۲۴	۹۸/۴۱	۹۸/۴۷	۹۸/۳۳	۹۸/۵۸	۹۸/۷۹	۹۸/۶۶	۹۸/۶۲	۹۸/۴۱	۹۸/۴۳
تعداد یونها برپایه ۱۲/۵ اتم اکسیژن										
Si	۳/۰۲۱	۳/۰۳۴	۳/۰۲۴	۳/۰۳۴	۳/۰۱۳	۲/۹۷۵	۲/۹۹۸	۲/۹۸۲	۲/۹۷۳	۲/۹۶۳
Ti	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۲۳
Al	۲/۰۷۹	۲/۱۵۰	۲/۱۵۱	۲/۰۳۰	۲/۱۷۶	۲/۰۷۲	۲/۰۲۷	۲/۰۹۱	۲/۰۴۹	۲/۰۹۳
Fe^{3+}	۰/۸۹۲	۰/۸۰۲	۰/۸۲۴	۰/۹۰۲	۰/۸۶۶	۰/۹۴۳	۰/۹۵۵	۰/۸۹۸	۰/۹۵۰	۰/۹۳۸
Mn	۰/۰۲۴	۰/۰۶۲	۰/۰۶۵	۰/۰۲۳	۰/۰۳۷	۰/۰۳۶	۰/۰۲۳	۰/۰۳۰	۰/۰۷۹	۰/۰۳۵
Mg	۰/۰۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴
Ca	۱/۹۷۱	۱/۹۳۵	۱/۹۱۵	۲/۰۰۴	۱/۸۶۷	۱/۹۸۱	۱/۹۵۳	۱/۹۶۶	۱/۹۴۴	۱/۹۲۷
Na	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸
K	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
اپیدوت	۱/۰۷۹	۱/۱۵	۱/۱۵۱	۱/۰۳	۱/۱۷۶	۱/۰۷۲	۱/۰۲۷	۱/۰۹۱	۱/۰۴۹	۱/۰۹۳
کلینوزوئیزیت	-۰/۰۸۴	-۰/۱۹۳	-۰/۱۲۵	-۰/۱۵۷	۰/۰۴۲۵	۰/۰۲۳	-۰/۰۴۰	-۰/۰۴۵	-۰/۰۰۷	۰/۰۵۳۸

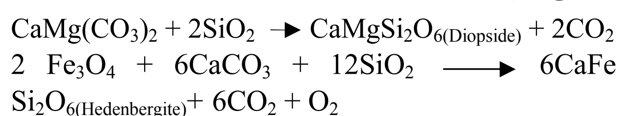
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

بحث

فرآیند اسکارن زایی

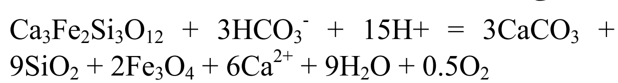
شواهد صحرایی و نتایج سنگ‌نگاری نشان می‌دهند که پهنه‌های اسکارنی منطقه مورد بررسی از نوع اسکارن کلسیمی هستند [۱۷]. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و بافتی، فرآیند اسکارن‌زایی در منطقه آغبلاغ را می‌توان به دو مرحله اصلی تقسیم کرد:

مرحله پیشرونده: این مرحله همزمان با جایگیری توده نفوذی گرانیتی در واحدهای شیل و ماسه سنگ سازند زاگون ولالون و نیز سنگ‌های کربناتی سازند باروت موجود در منطقه مورد بررسی آغاز می‌شود. در این مرحله، در اثر شار گرمایی برآمده از توده نفوذی به درون سنگ‌های میزبان، دگرگونی ایزوشیمیایی در سنگ‌های در برگیرنده رخ داده و سبب گسترش واحدهای مرمر و سیلیکات کلسیم - هورنفلس شده است؛ البته تعیین مرز دقیق هورنفلس و اسکارن از هم در محل مشکل است. در این مرحله، جز خروج مواد انتقال مواد فرّار از سنگ‌های میزبان، (عناصر) صورت نگرفته که باعث دگرگونی، تقریباً ایزوشیمیایی در این سنگ‌ها شده است. در واکنش‌های دگرگونی فقط اجزای فرار سنگ چون O_2، CO_2 و H_2O قدری تغییر کرده‌اند. هیچ نوع کانی‌سازی اکسیدی و سولفیدی در این مرحله انجام نشده است. فرآیند دگرنهادی و تشکیل اسکارن با شروع تبلور ماگمای نفوذی و آزاد شدن سیال‌های آبگون ماگمایی صورت گرفته و سبب گسترش پهنه‌های اگزواسکارن در سنگ‌های رسوبی (کالک، شیل و ماسه سنگ) شده است. تشکیل این مرحله در ذخیره آغبلاغ با کانی‌های به نسبت درشت گارنت و پیروکسن کلسیم و آهن‌دار مشخص می‌شود. پیروکسن‌ها (دیوپسید و هدنبرژیت) طی این مرحله از طریق واکنش کربن‌زدایی بین سنگ کالک و یا دولومیت و سیال‌های گرمابی بر پایه واکنش های زیر تشکیل شده‌اند [۱۸].

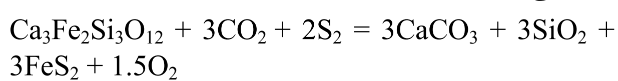

$$CaMg(CO_3)_2 + 2SiO_2 \rightarrow CaMgSi_2O_{6(Diopside)} + 2CO_2$$
$$2\ Fe_3O_4 + 6CaCO_3 + 12SiO_2 \longrightarrow 6CaFeSi_2O_{6(Hedenbergite)} + 6CO_2 + O_2$$

مرحله پسرونده: طی این مرحله، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب (پیروکسن و گارنت) توسط سیال‌های گرمابی به نسبت دما پایین به کانی‌های کالک سیلیکاتی آبدار (اپیدوت و ترمولیت-اکتینولیت) و سیلیکاتی (کوارتز و کلریت) و غیر سیلیکاتی تیره (سولفیدها و اکسیدها) دگرسان شده‌اند. نهشت کانی‌های تیره (مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت) بیشتر با شکستگی‌ها کنترل شده است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و بافتی، این مرحله را می‌توان به دو زیر مرحله نیز تقسیم کرد:

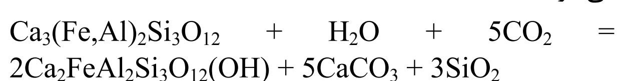
الف) زیر مرحله پسرونده آغازین: طی این مرحله، در اثر دگرسانی کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب تشکیل شده در مرحله پیشرونده، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت)، کوارتز و کربنات (کلسیت) در راستای شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. تشکیل کانی مگنتیت طی این مرحله می‌تواند در اثر واکنش شیمیایی زیر صورت گرفته باشد [۲۰]:


$$Ca_3Fe_2Si_3O_{12} + 3HCO_3^- + 15H+ = 3CaCO_3 + 9SiO_2 + 2Fe_3O_4 + 6Ca^{2+} + 9H_2O + 0.5O_2$$

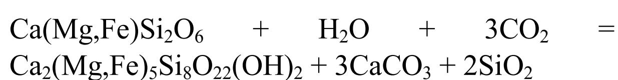
حضور کانی‌های پیریت-کلسیت-کوارتز همراه با گارنت می‌تواند از طریق سولفیدشدگی و کربن‌گیری گارنت در اثر واکنش شیمیایی زیر صورت گرفته باشد [۲۰]:


$$Ca_3Fe_2Si_3O_{12} + 3CO_2 + 2S_2 = 3CaCO_3 + 3SiO_2 + 3FeS_2 + 1.5O_2$$

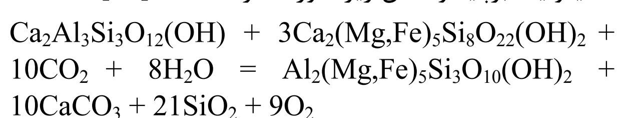
کانی اپیدوت نیز توسط سیال‌های گرمابی به نسبت دما پایین غنی از CO_2 از دگرسانی گارنت‌ها طی واکنش زیر تشکیل می‌شود [۲۱]:


$$Ca_3(Fe,Al)_2Si_3O_{12} + H_2O + 5CO_2 = 2Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}(OH) + 5CaCO_3 + 3SiO_2$$

آکتینولیت نیز از دگرسانی کلینوپیروکسن‌ها بر اثر واکنش زیر شکل گرفته است [۲۲]:


$$Ca(Mg,Fe)Si_2O_6 + H_2O + 3CO_2 = Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 3CaCO_3 + 2SiO_2$$

ب) زیر مرحله پسرونده تأخیری: در این مرحله کالک سیلیکات‌های آبدار و بدون آب تشکیل شده در مراحل پیشین اسکارن‌زایی توسط سیال‌های دما پایین‌دگرسان شده و مجموعه کانی‌های ریزدانه مثل کلریت، کلسیت و کوارتز حاصل شده‌اند. تشکیل این مجموعه کانیایی از دگرسانی اپیدوت و ترمولیت-آکتینولیت برپایه واکنش زیر صورت گرفته است [۲۳]:

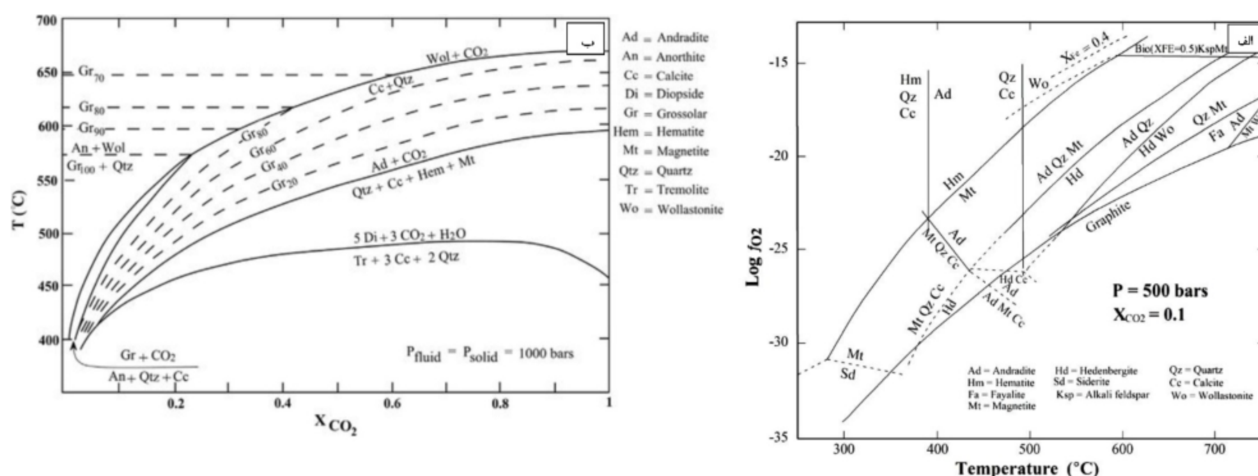

$$Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH) + 3Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 10CO_2 + 8H_2O = Al_2(Mg,Fe)_5Si_3O_{10}(OH)_2 + 10CaCO_3 + 21SiO_2 + 9O_2$$

شرایط فیزیکوشیمیایی فرآیندهای اسکارن‌زائی در ذخیره آغبلاغ

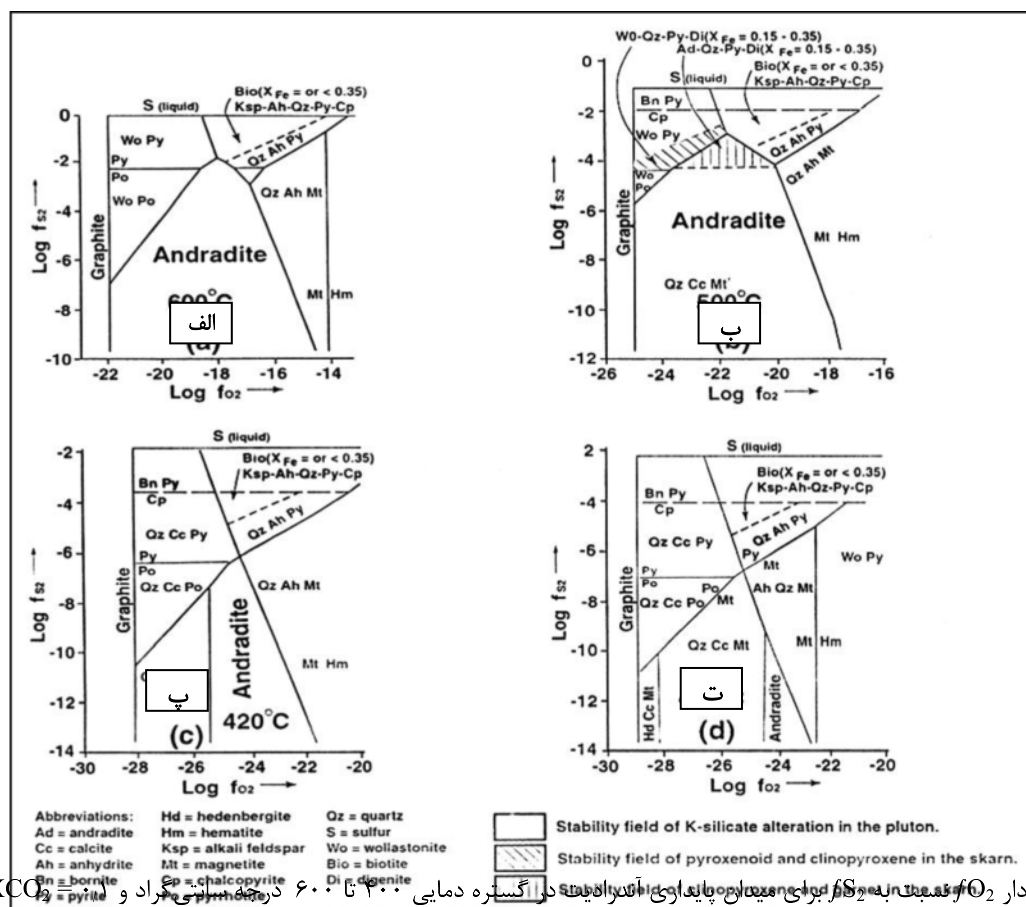
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]

بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه ریزکاوالکترونی، اسکارن آغبلاغ دارای مجموعه کانی‌های سیلیکاتی مثل کلینوپیروکسن، گارنت، ترمولیت، آکتینولیت، کلریت و اپیدوت است. پایداری این کانی‌ها به شرایط شیمیایی (ترکیب توده نفوذی و سیال کانه‌دار) و فیزیکی (دما و فشار) محیط نهشت بستگی دارد. گارنت با ترکیب غالب آندرادیت بویژه در اسکارن کلسیمی نشان دهنده وجود شرایط اکسایشی و سیال‌های غنی از CaO و FeO است [۲۴]. مقدار بالای آندرادیت (Fe^{3+}) و مقدار پایین‌تر (Mn^{2+}) اسپسارتین در گارنت منطقه مورد بررسی نشان دهنده اسکارن اکسایشی است [۲۵]. افزایش گریزندگی اکسیژن، fO2 و محلول‌های با شوری بالا شرایط را برای افزایش عضو پایانی آندرادیت در سری محلول جامد (آندرادیت-گروسولار) مهیا می‌کند [۲۳]. fO_2، fS_2 و XCO_2 مهم‌ترین متغیرها در تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانی‌های روشن و تیره هستند. از آن جا که همه کانی‌های موجود در هاله‌های اسکارنی منطقه مورد بررسی در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H قرار دارند، در این پژوهش از نمودار دو متغیره fO_2 نسبت به دما (شکل ۷ الف) برای تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی سیال‌های اسکارن‌ساز در آغبلاغ استفاده شد. این نمودار برای شرایط فشار ۰/۵ کیلوبار و XCO_2= ۰/۱ تهیه شده است [۲۰]. نبود ولاستونیت در اسکارن‌های منطقه آغبلاغ نشان می‌دهد که مجموعه گارنت (آندرادیت-گروسولار) و کلینوپیروکسن (دیوپسید- هدنبرژیت) در دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است [۲۰] (شکل ۷ الف). آندرادیت گستره پایداری وسیعی در گستره دمایی ۷۰۰-۴۰۰ درجه سانتی گراد و ۱۵- تا ۲۵-= $\log fO_2$ دارد (شکل ۷ الف). این کانی در حالت اکسایشی متوسط تا پایین پایدار است (زیر بافر هماتیت- مگنتیت) که با افزایش fO_2 ، به مگنتیت، کوارتز و کلسیت تبدیل می‌شود. با کاهش دما، گستره پایداری آندرادیت به مقادیر fO_2 و fS_2 پایین‌تر منتقل می‌شود. جانشینی آندرادیت توسط مجموعه مگنتیت + کلسیت + کوارتز در منطقه مورد بررسی بیانگر دمای حدود ۴۳۰ درجه سانتی-گراد برای واکنش یاد شده است (شکل ۷ الف). در دمای کمتر از ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد، سیال گرمابی دیگر با مجموعه کالک‌سیلیکاتی بی‌آب در تعادل نبوده و به احتمال بسیار در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد شروع به دگرسانی نموده‌اند (شکل ۷ الف). بر اساس نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی، گارنت‌های آغبلاغ در سری محلول جامد آندرادیت-گروسولار هستند و گستره ترکیبی $Adr_{81.97-89.1}$ $Gr_{0.05-6.8}$ $Alm_{5.6-10.7}$ و $Adr_{61.7-27.2}$ $Gr_{25.4-27.2}$ $Alm_{5.1-7.5}$ را نشان می‌دهند.

بر اساس نمودار XCO_2-T [۲۶] (شکل ۷ ب)، با در نظر گرفتن XCO_2 که در محیط‌های اسکارنی ۰/۲ یا کمتر است، گارنت‌های آغبلاغ در گستره دمایی ۵۰۰-۴۵۰ درجه سانتی-گراد تشکیل شده‌اند. نبود ولاستونیت، هم رشدی بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن، نبود هاله واکنشی بین این دو کانی و نبود بافت های جانشینی نشان می‌دهد که این دو کانی به طور همزمان در گستره دمایی ۵۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. کانی دیوپسید در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مجموعه ترمولیت - اکتینولیت + کلسیت + کوارتز تبدیل می‌شود. بر اساس نمودار fO_2 نسبت به fS_2 [۲۰] (شکل ۸)، در دماهای بیش از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، حتی در گریزندگی بالای گوگرد، آندرادیت پایدار است (شکل‌های ۸ الف، ب). در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، سیال در تعادل با توده نفوذی و با گریزندگی به نسبت بالای گوگرد ($fS_2> 10^{-6}$) دیگر در تعادل با آندرادیت نیست و آن را به مجموعه کوارتز + کلسیت + پیریت دگرسان می‌کند [۲۰] (شکل ۸ پ). با کاهش گریزندگی گوگرد ($fS_2< 10^{-6}$)، چنین سیالی می تواند مجموعه کوارتز+کلسیت+مگنتیت را تولید کند [۲۰] (شکل ۸ ت). با توجه به جانشینی پیریت و مگنتیت توسط کالکوپیریت، می‌توان نتیجه گرفت که عنصر مس کمی دیرتر از آهن وارد سامانه اسکارنی شده است. تشکیل مجموعه کانیایی دما پایین مانند کلریت، می‌تواند بیانگر این حقیقت باشد که سیال‌های دگرنهاده تأخیری به احتمال بسیار طبیعت اکسیدکنندگی و هیدرولیزکنندگی بیشتری داشته‌اند. در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (مرحله پسرونده پسین)، آمیخته شدن سیال ماگمایی دارای گوگرد با سیال جوی و اکسیدی شدن گونه سولفیدی سیال به سولفات و در پی آن کاهش pH سیال، سبب تشکیل کانی‌های رسی (کلریت) شده است.



شکل ۷ (الف) نمودار fO_2 نسبت به دما در فشار سیال ۵۰۰ بار و XCO_2=۰/۱ برای سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H [۲۰] و (ب) نمودار XCO_2-T در فشار ۱۰۰۰ بار. گروسولار Gr: خالص، Ad: آندرادیت خالص و مقادیر Gr_{20} تا Gr_{80} محلول جامد آندرادیت-گروسولار هستند [۲۶].



شکل ۸ نمودار fO_2 نسبت به fS_2 برای میدان پایداری آندرادیت در گستره دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و XCO_2=۰/۱ [۲۰].

برداشت

با جایگیری و سرد شدن توده گرانیتی به سن کرتاسه پسین در سنگ‌های کربناتی سازند باروت و شیل و ماسه‌سنگ سازند زاگون-لالون، دگرگونی مجاورتی و دگرنهادی سبب ایجاد اسکارن آهن- مس در منطقه آغبلاغ شده است. اسکارن‌زایی شامل دو مرحله پیشرونده و پسرونده است. در مرحله پیشرونده، کانی‌های گارنت همسانگرد که تغییرات بسیار جزئی در ترکیب خود از مرکز به لبه نشان می‌دهند، در سری محلول جامد گروسولار – آندرایت با آندرادیت غالب و با نسبت بالای Fe/(Fe+Al) تشکیل شده‌اند. تشکیل گارنت نوع آندرادیتی

بیانگر شرایط اکسایشی در محیط تشکیل است که فراوانی کم کلینوپیروکسن نسبت به گارنت نیز این امر را تایید می‌کند. کلینوپیروکسن از نوع سالیت در سری محلول جامد دیوپسید-هدنبرژیت قرار دارد که نسبت بالای Fe/(Fe+Mg) را نشان می‌دهد. نبود ولاستونیت نشان دهنده دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در این مرحله است. گارنت (آندرادیت-گروسولار) در گستره دمایی ۵۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است.

آندرادیت در مرحله پسرونده، در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد و $fS_2 > 10^{-6}$، به مجموعه کوارتز + کلسیت + پیریت و در $fS_2 < 10^{-6}$ به مجموعه کوارتز + کلسیت + مگنتیت دگرسان شده است. دیوپسید در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترمولیت + کوارتز + کلسیت دگرسان گردیده است. در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (مرحله پسرونده پسین)، آمیخته شدن سیال ماگمایی دارای گوگرد با سیال جوی و اکسیدی شدن گونه سولفیدی سیال به سولفات و در پی آن کاهش pH سیال سبب تشکیل کانی‌های رسی (کلریت) شده است. نهشت مگنتیت در آغاز مرحله پسرونده صورت گرفته و با احیایی شدن سیال و افزایش کانی-های سولفیدی از مقدار آن کاسته شده است.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برخوردار بوده‌اند، که شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادهای ارزنده و سازنده داوران محترم مجله نیز سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Karimzadeh Somarin A., "*Geochemical effects of endoskarn formation in the Mazraeh Cu–Fe skarn deposit in northwestern Iran*", Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis 4 (2005) 307-315.

[2] Mollai H., Pe-Piper G., Dabiri R., "*Genetic relationships between skarn ore deposits and magmatic activity in the Ahar region, western Alborz, NW Iran: Evidence for metasomatism and copper mineralization*", Geologica Carpathica 65 (2014) 207-225.

[3] Baghban S., Hosseinzadeh M. R., Moayyed M., Mokhtari M. A., Gregory D., "*Geology, mineral chemistry and formation conditions of calc-silicate minerals of Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Eastern Azarbaidjan Province, NW Iran*", Ore Geology Reviews 68 (2015) 79-96.

[4] Calagari A., Hosseinzadeh G., "*The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran*", Journal of Asian Earth Sciences 28 (2006) 423-438.

[5] Mokhtari M. A. A., "*The mineralogy and petrology of Pahnavar Fe skarn in the Eastern Azarbaidjan, NW Iran*", Central European journal of geology 4 (2012) 578-591.

[6] Siahcheshm K., "*Mineralogy and metasomatic evolution of the Mianeh Iron skarn deposit, Norduz-Agarak border, NW Iran*", Arabian Journal of Geosciences 10 (2017) 1-16.

[7] Ghalamghash J., Hoshmand Maanavi S., Vosuq Abedini M., "*Geology, geochemistry and petrogenesis of Oshnavieh intrusive complex (northwest of Iran) (in Persian)",* Journal of Earth Sciences 88 (2013) 219-232.

[8] Shafaii Moghadam H., Corfu F., Stern R. J., Lotfibakhsh A ., "*The Eastern Khoy Metamorphic Complex of NW Iran: A Jurassic ophiolite or continuation of the Sanandaj-Sirjan Zone*", Journal of the Geological Society 176 (2018) 517-529.

[9] Habibikia D., "*Investigation on the economic geology and exploration of Tungsten mineralization in north of Oshnavieh, West-Azerbaijan Province (in Persian)"*, MSc Thesis, Tarbiat Moalem University, (1999) 1-210.

[10] Jalili B., Calagari A., Simmonds V., Abedini A., *"Investigation on the geology and mineralogy of iron skarn at Gardehgol, north of Oshnavieh, West Azarbaijan Province*", 5th Conference of Iranian Economic Geological Society (2013).

[11] Pichab Kavosh Company, "*Exploration report of the polymetallic Aghbolag area*", (2011).

[12] Naghizadeh R., "*Geological map of Agbolagh area 1:20000*", Geological Survey of Iran (2011).

[13] Whitney D. L., Evans B. W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[14] Meinert L. D., "*Skarns and skarn deposits*", Geoscience Canada 19 (1992) 145-162.

[15] Droop G. T. R., "*General equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria*", Mineralogical Magazine 6 (1978) 99-112.

[16] Deer W. A., Howie, R. A., Zussman, J., " *Rock-forming minerals*", 2nd edition. Longman (1978) 1-668.

TiO_2-H_2O-CO_2", Journal of Petrology 29 (1988) 455-522.

[22] Lentz D. R., Walker J. A., Stirling J. A. R., "*Millstream Cu-Fe skarn deposit: An example of a Cu-bearing magnetite-rich skarn system in northern New Brunswick*", Exploration and Mining Geology 4 (1995) 15-31.

[23] Deer W. A., Howie R. A., Zussman, J., "*An introduction to the rock forming minerals*", Second edition. Longman Scientific and Technical (1992) 1-696.

[24] Jamtveit B., Wogelius R.A., Fraser D. G., "*Zonation patterns of skarn garnets, records of hydrothermal system evolution*", Geology 21 (1993) 113-116.

[25] Einaudi M. T., Meinert L. D., Newberry R. J., "*Skarn deposits*", Economic Geology 75th Anniversary (1981) 317-391.

[26] Sweeney M., "*Geochemistry of garnet from the north ore Shoot, Bingham district, Utah*", Unpublished MSc thesis, University of Utah (1980) 1-154.

[17] Einaudi M. T., Burt D. M., "*Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposits*", Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists 7 (1982) 745-754.

[18] Meinert L. D., Dipple G. M., Nicolescu S., "*World skarn deposits*", Economic Geology 100th Anniversary Volume (2005) 299-336.

[19] Franz G, Liebscher A., "*Physical and chemical properties of the epidote minerals-an introduction. In: Franz G, Liebscher A (eds) Epidotes*", Review Mineral Geochemistry 56 (2004) 1-82.

[20] Einaudi M. T., "*Descriptions of skarns associated with porphyry copper plutons. In: Titley, S.R., (Eds.), Advances in geology of porphyry copper deposits, Southwestern North America*", University of Arizona Press, Tucson (1982a) 1592-1606.

[21] Berman R. G., "*Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na_2O-K_2O- CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.3.7]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.577]